

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.86

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-119-130>

Снижение износа высоконагруженных узлов транспортных средств

А.А. Демьянов , И.Н. Щербаков 

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ alexys61@yandex.ru

Аннотация

Введение. Опорно-поворотный узел обеспечивает связь между поворотной и неповоротной частью машин и механизмов кранов, экскаваторов, автоприцепов, железнодорожных подвижных составов. Применительно к подвижному составу он соединяет грузонесущую часть вагона с тележкой и является одним из наиболее ответственных и быстроизнашивающихся узлов трения. Его техническое состояние влияет на интенсивность и форму износа самих поверхностей, величину сопротивления повороту тележки при движении вагона на криволинейных участках пути, амплитуду боковой раскачки вагона, интенсивность износа гребней колес и, как следствие, на безопасность эксплуатации подвижного состава в целом. До сих пор для данного узла применяется периодическая консистентная смазка, которая даже при небольшом пробеге успевает выдавиться из зон контакта и тем самым создать условия для преобладания сухого трения. До настоящего времени различные предложения по решению этой проблемы не нашли применения в серийном производстве по ряду причин, и поэтому поиск путей снижения износа в опорно-поворотном узле вагонов до сих пор является актуальным. В данном исследовании предлагается решение этой проблемы, не требующее конструктивных изменений самого опорно-поворотного узла. Целью данной работы является разработка технологичного антифрикционного покрытия с хорошей адгезией, которое будет нанесено на поверхность сменного диска, устанавливаемого между трущимися поверхностями шкворневого узла во время плановых ремонтов ходовой части вагона. Такой подход позволит снизить силу трения и интенсивность износа в узле при наступлении смазочного голодания из-за выдавливания консистентной смазки.

Материалы и методы. Антифрикционные характеристики разработанного покрытия определялась на машине трения, обеспечивающей нагрузки на исследуемый образец до 5 000 Н и скорости скольжения от 0,13 м/с. Образцы исследовались методом сканирующей электронной микроскопии (микроскоп FEI Quanta 200). СЭМ-изображения получены в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов (BSE) с помощью полупроводникового детектора. Для анализа элементного состава образца использовался рентгеновский энерго-дисперсионный спектрометр (EDAX Element EDS System).

Результаты исследования. Разработано трехслойное функциональное фосфорсодержащее композиционное покрытие поверхностей узла, позволяющее существенно снизить в нем коэффициент трения и, как следствие, интенсивность износа шкворневого узла из-за сухого трения. Определены оптимальные условия получения слоев композиционного покрытия. Изучено влияние толщины каждого слоя и условий его нанесения на функциональные характеристики.

Обсуждение и заключение. Предложенное решение отличается технологичностью и при соответствующей адаптации может быть использовано для снижения интенсивности износа в любом открытом опорно-поворотном узле без кардинального изменения его конструкции. Методы получения слоев покрытия доступны и технологичны для серийного применения.

Ключевые слова: рельсовый подвижной состав, шкворневой узел, открытый узел трения, композиционное многослойное покрытие, снижение износа

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Демьянов А.А., Щербakov И.Н. Снижение износа высоконагруженных узлов транспортных средств. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;23(4):119–130. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-119-130>

Original article

Wear Reduction in Heavily Loaded Units of Transport Vehicles

Aleksey A. Demyanov , Igor N. Shcherbakov 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ alexys61@yandex.ru

Abstract

Introduction. The pivot assembly provides connection between the rotating and non-rotating parts of machines and mechanisms such as cranes, excavators, trailers, railway rolling stocks. In relation to rolling stock, it connects the load-carrying part of the car with the bogie and is one of the most critical and wear-out friction units. Its technical condition affects the intensity and form of wear of the surfaces themselves, the amount of resistance to rotation of the bogie when the car moves in curved sections of the track, the amplitude of the lateral rocking of the car, the intensity of wear of the wheel flanges and, as a consequence, the safety of operation of the rolling stock as a whole. Until now, periodic grease is used for this unit, which, even with a short mileage, manages to be squeezed out of the contact zones and, thereby, creates conditions for the predominance of dry friction. Until now, various proposals to solve this problem have not found application in mass production for a number of reasons, and therefore the search for ways to reduce wear in the pivot assembly of cars is still relevant. This study proposes a solution to this problem that does not require structural changes to the pivot assembly itself. The aim of this work was to develop a technologically advanced anti-friction coating with good adhesion, which will be applied to the surface of a replaceable disk installed between the rubbing surfaces of the pivot assembly during scheduled repairs of the car chassis. This approach will reduce the friction force and wear rate in the unit when lubrication shortage occurs due to squeezing out of the grease.

Materials and Methods. Antifriction characteristics of the developed coating was observed on a friction machine providing specific loads on the test sample up to 5000 N and a sliding speed from 0.13 m/s. The samples were examined by scanning electron microscopy (FEI Quanta 200 microscope). SEM images were acquired in a back-scattered electron (BSE) mode using a semiconductor detector. To analyze the elemental composition of beam samples, an energy dispersive spectrometer (EDAX Element EDS system) was used.

Results. A three-layer functional phosphorus-containing composite coating of the surfaces of the unit was developed, which made it possible to significantly reduce the coefficient of friction and, as a consequence, the intensity of wear of the pivot unit surface during dry friction. The optimal conditions for obtaining composite coating layers were determined. The influence of the thickness of each layer and the conditions for its production on its functional characteristics was studied.

Discussion and Conclusion. The proposed solution is manufacturable and, with appropriate adaptation, can be used to reduce wear in any open pivot assembly without radically changing its design. The methods for producing coating layers are accessible and technologically advanced for serial use.

Keywords: rail rolling stock, pivot assembly, open friction assembly, composite multilayer coating, wear reduction

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Demyanov AA, Shcherbakov IN. Wear Reduction in Heavily Loaded Units of Transport Vehicles. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):119–130. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-119-130>

Введение. На железнодорожном транспорте одним из наиболее ответственных и быстроизнашивающихся узлов трения является опорно-поворотный узел, соединяющий кузов с тележкой вагона. Общеизвестной проблемой этого узла является самовывдавливание смазки из него даже при незначительных пробегах с последующим контактом поверхностей в режиме сухого трения и соответствующей интенсивностью износа [1].

В настоящее время только плановое восстановление изношенных опорно-поворотных узлов ежегодно выливается в огромные суммы, даже без учета потерь от простоя вагонов и затрат на их внеплановый ремонт. Если принять во внимание тот факт, что в нашей стране вагонов, находящихся в обороте, более 1,3 млн, то задача снижения трения и износа в этом узле является актуальной. Эта проблема является отраслевой в

масштабе всех индустриально развитых стран мира [2]. К настоящему времени существуют различные подходы к решению этой проблемы, которые укрупненно можно разделить на несколько принципиальных групп.

К первой группе относятся методы, в основе которых лежит изменение конструкции узла с целью увеличения диаметра опорной поверхности и, как следствие, уменьшение удельных нагрузок. Недостатком такого подхода является исключение взаимозаменяемости элементов узла при массовом ремонте. Во второй группе — методы, при которых между трущимися поверхностями устанавливаются сменные вкладыши из различных полимерных износостойких материалов в виде круглого корыта с кольцевыми канавками на дне для накопления смазки. Наличие сменного элемента удешевляет ремонт данного узла. Однако в тяжелых условиях эксплуатации шкворневого узла полимерные материалы имеют очень небольшой срок службы. Третья группа включает в себя методы, при которых между трущимися поверхностями устанавливаются сменные вкладыши из высокопрочных сталей, например, марганцовистой. Однако такой подход не исключает износ поверхности самого опорно-поворотного узла. После неизбежного выдавливания вязкой смазки интенсивность изнашивания будет определяться соотношением твердости контактирующих поверхностей сменного диска и основного узла. К четвертой группе методов можно отнести методы совершенствования термической обработки контактирующих поверхностей.

Еще одним вариантом решения устранения повышенного трения в шкворневом узле является установка между трущимися поверхностями менее твердого диска с отверстиями, распределенными по всей его поверхности. Перфорация в диске заполняется твердой смазкой. Подача смазки на поверхность трения в этом случае носит адаптивный характер и определяется интенсивностью износа поверхности сменного диска (рис. 1) [3].

Поскольку выдавливание вязкой смазки и периодический контакт поверхностей в режиме сухого трения в данном узле неизбежен, то предлагается повысить долговечность этого узла посредством снижения интенсивности изнашивания за счет установки между поверхностями трения сменного диска с нанесенным прочным и технологичным антифрикционным покрытием. При таком подходе смазочное голодание при выдавливании консистентной регламентной смазки будет меньше влиять на интенсивность износа и, как следствие, продлевать долговечность этого узла [4–6].

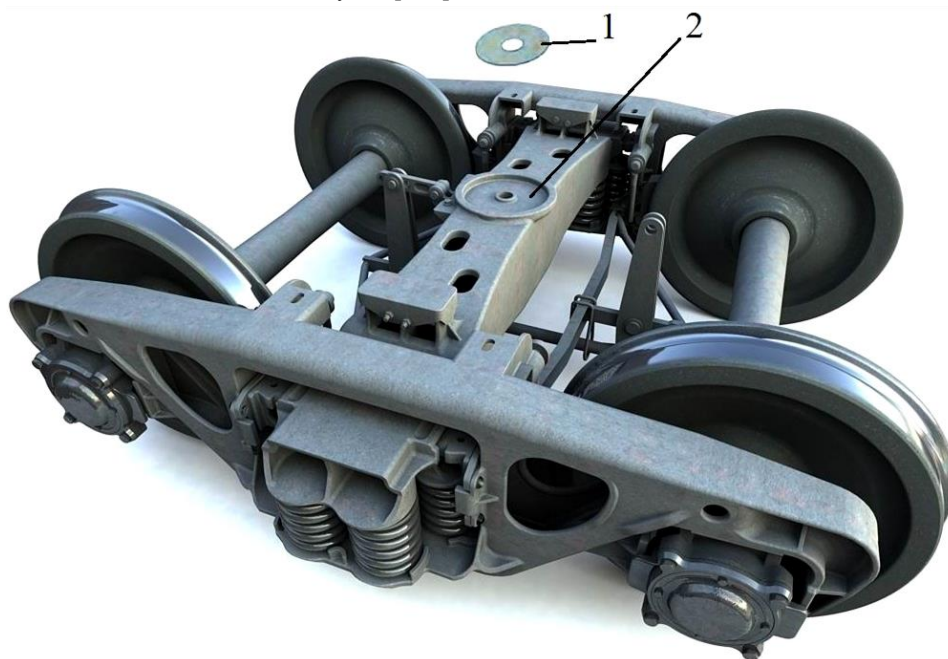


Рис. 1. Опорно-поворотный узел подвижного состава: 1 — сменный диск; 2 — рама с подпятником

Модификация поверхностей функциональными покрытиями является хорошо проверенным методом повышения износостойкости узлов, работающих в сложных условиях — при высоких нагрузках, отсутствии или перебоях в подаче смазки в зону трения, в агрессивно-абразивных средах и т. п. [7–13].

В данном исследовании целью являлась разработка покрытия, обеспечивающего на поверхностях низкого коэффициента трения, а также создание условий жесткого динамического контакта надежного сцепления с материалом покрываемого изделия.

Материалы и методы. Решать поставленную задачу было принято посредством разработки трехслойного покрытия из комбинации нескольких слоев фосфорсодержащего композита [14]. Для соблюдения заданных требований проводилось изучение влияния толщины каждого слоя и условий его изготовления на его

функциональные характеристики. Покрытие наносилось послойно. В качестве материала для основы, т. е. сменного диска, была выбрана хромистая сталь.

Первый наносимый слой состоял из композиционного никель-фосфорного соединения, модифицированного дисульфидом молибдена. В его задачи входило обеспечение высокой адгезии к основе. Получали данный слой методом химического осаждения. Последующий слой изготавливали на основе фосфатного связующего [14, 15], задачей которого являлось обеспечение связки первого слоя с третьим и повышение коррозионной стойкости ввиду того, что шкворень — это открытый узел трения. С целью снижения себестоимости и повышения технологичности слой получали несколькими простыми и технологичными методами (распылением, окунанием и намазыванием) с последующей сравнительной оценкой его функциональных свойств. Третий слой, обеспечивающий антифрикционные свойства, также получали методом распыления и намазывания с последующей сравнительной оценкой его свойств [14, 15].

Качество адгезии слоя к предыдущему оценивалось по результатам методики решетчатых надрезов Cross-cut test, производимых резцом-адгезиметром¹. Толщина каждого слоя измерялась толщиномером комбинированного действия. Антифрикционные параметры третьего слоя определялись на машине трения ИИ 5018. Анализ поверхности слоев проводился методом сканирующей электронной микроскопии на микроскопе FEI Quanta 200. СЭМ-изображения были получены в режиме регистрации обратно-рассеянных электронов (BSE) с помощью полупроводникового детектора. Для анализа элементного состава образца использовался рентгеновский энерго-дисперсионный спектрометр EDAX Element EDS System.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований проводилась компьютерными методами обработки результатов инженерного эксперимента.

В процессе исследований определялись условия, оказывающие влияние на конечные параметры получаемого покрытия. Исследовалось, как влияют:

- температура раствора на толщину образующегося покрытия;
- толщина третьего слоя на его сцепление с предыдущим;
- толщина третьего слоя и условий его получения на величину его коэффициента трения.

Первый слой (никель-фосфорное покрытие) был получен химическим осаждением. Для обеспечения седиментационной устойчивости присутствующих в растворе химического осаждения модификаторов был применен магнитный миксер ПЭ-6110 с функцией подогрева. Процесс осаждения этого слоя происходил в условиях 90–92 °С. Адгезия покрытия к основанию оценивалась по стандартной для таких случаев методике². Второй слой (фосфатное покрытие), согласно идее, наносился тремя разными методами: окунанием, намазыванием и распылением [14]. Третий (антифрикционный) слой был получен несколькими методами — распылением и намазыванием поверх фосфатного связующего [15].

Поскольку слои полученного композиционного покрытия не работоспособны без термической обработки, было исследовано влияние режимов термообработки слоев на их конечные свойства с последующим подбором оптимального режима для каждого из них.

После нанесения на первый, второй слой подвергался термической обработке при температуре от 250 до 400 °С в течение одного часа. Режим термической обработки не зависел от способа нанесения второго слоя. Он подбирался экспериментально с учетом наилучших показателей по количеству сквозных пор до основы [11]. После нанесения третьего слоя на второй, проводилась его термообработка в диапазоне температур от 300 до 450 °С в течение одного часа. Для исследования антифрикционных свойств третьего слоя, в зависимости от температуры термообработки, было проведено модельное испытание нескольких образцов, полученных при разной температуре.

Определение фрикционных характеристик третьего слоя производилось по схеме «диск-колодочка». Покрытие наносилось на образец «колодочка». Общий вид и схема сопряжения образцов приведены на рис. 2.

При назначении нагрузки для модельного эксперимента исходили из того, что наиболее распространенным видом подвижного состава являются грузовые полувагоны различных модификаций с усредненной грузоподъемностью порядка 70 и массой 23 тонны. С учетом того, что на каждый опорный узел приходится половина суммарного веса, а диаметр подпятника и диаметр отверстия под шкворень составляют 302 и 54 мм соответственно, получили фактические контактные давления, которое составило 6,7 МПа.

Скорость относительного скольжения поверхностей в опорно-поворотном узле определяется радиусом кривой, в которую входит вагон, и его текущей скоростью, задаваемой машинистом в зависимости от условий

¹ Paints and varnishes. Cross-cut test. ISO 2409:2020. <https://www.iso.org/standard/76041.html>

² ГОСТ 9.302-88. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. URL: <https://gostrf.com/normadata/1/4294850/4294850372.pdf>

движения. Поскольку на практике скорость скольжения имеет малые значения, то для сравнительного исследования между образцами была принята минимально возможная частота вращения вала нижнего образца, 50 мин^{-1} .

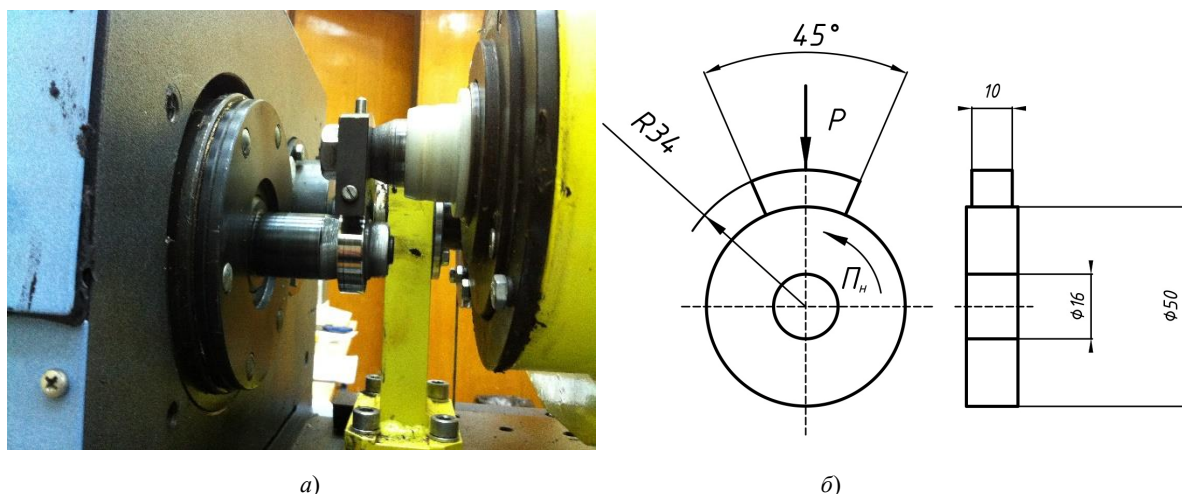


Рис. 2. Образцы «диск-колодка»: а — общий вид; б — схема сопряжения

Результаты исследования. В ходе исследования было установлено, что первый слой лучше всего получается при использовании химического осаждения со скоростью до 40 мкм/ч . Было выявлено значительное влияние на толщину и качество получаемого покрытия температуры раствора и концентрации компонентов. На основании полученных результатов по измерению адгезии было установлено, что термическую обработку первого слоя лучше всего делать при температуре 400°C в течение одного часа. При данной температуре образуются фаза Ni и износостойкий Ni_3P [14, 15]. Микрофотографии слоя представлены на рис. 3, элементный анализ в таблицах 1 и 2, а распределение элементов в первом слое — на рис. 4.

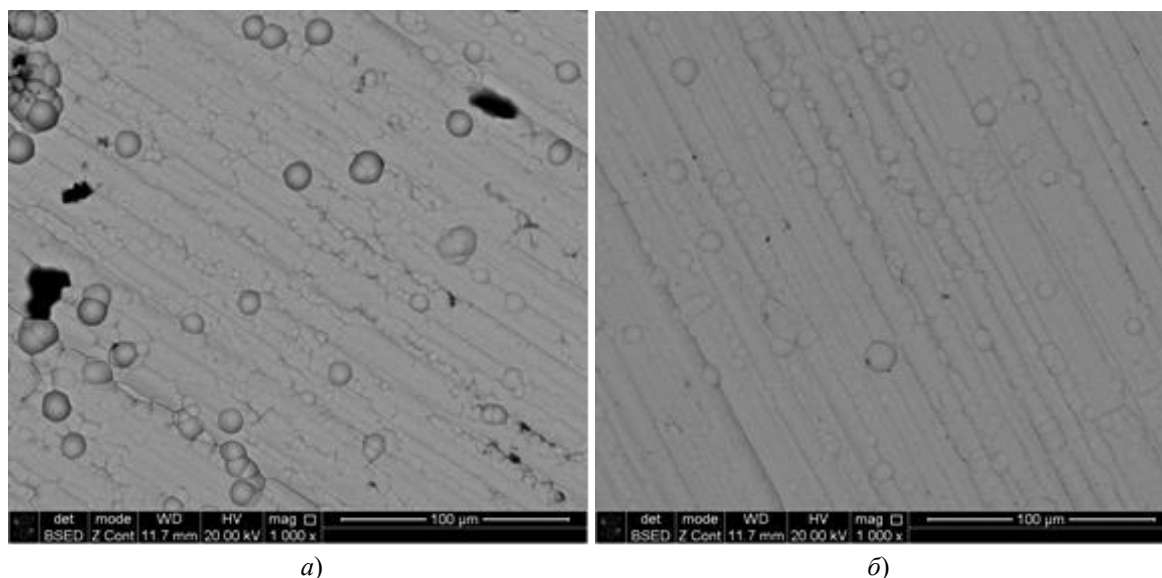


Рис. 3. Микрофотографии первого слоя: а — до термической обработки; б — после обработки при температуре 400°C в течение одного часа

Таблица 1

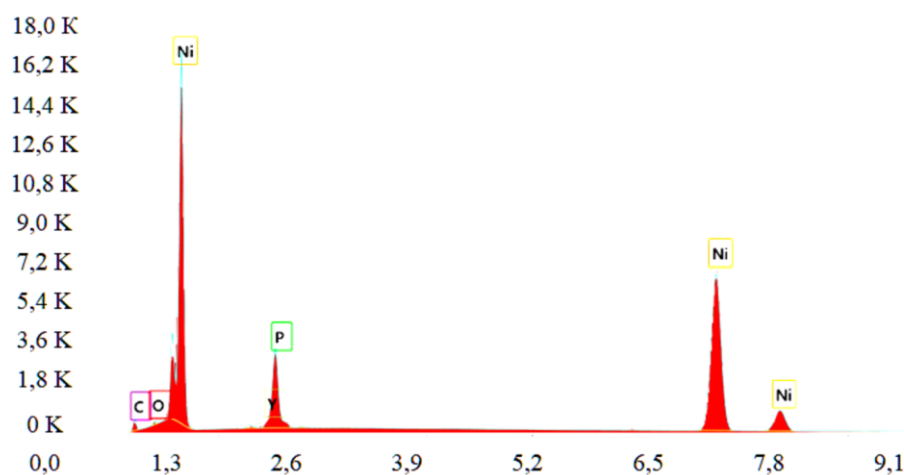
Элементный анализ первого слоя до термической обработки

Element	Weight, %	MDL	Atomic, %	Error, %
C K	8,3	0,56	28,5	14,1
O K	0,6	0,22	1,6	23,5
P K	9,3	0,12	12,5	7,0
Ni K	79,9	0,41	56,4	2,2
Y K	2,1	0,22	1,0	10,7

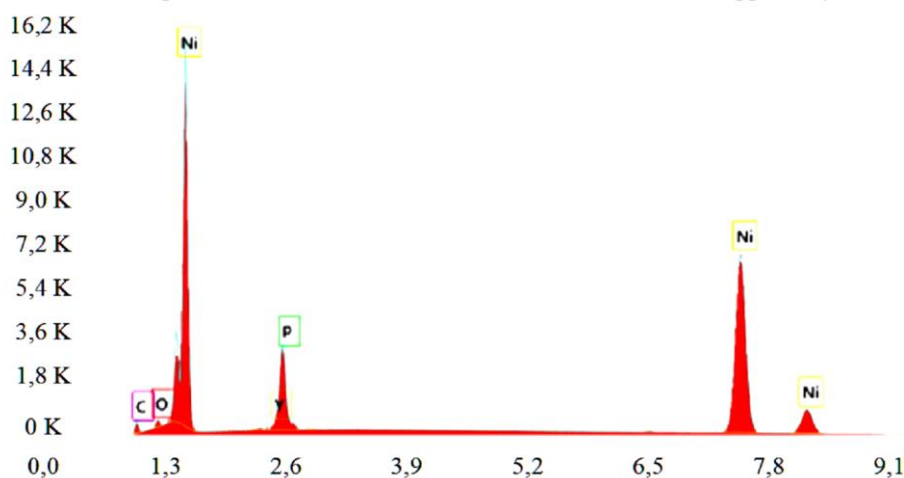
Таблица 2

Элементный анализ первого слоя после термической обработки

Element	Weight, %	MDL	Atomic, %	Error, %
C K	7,6	0,52	26,5	14,2
O K	1,4	0,19	3,6	13,5
P K	8,9	0,14	12,0	7,0
Ni K	80,1	0,33	57,0	2,2
Y K	2,1	0,20	1,0	10,7



а)



б)

Рис. 4. Распределение элементов в первом слое:

а — до термической обработки; б — после обработки при температуре 400 °С в течение одного часа

По приведенным на рис. 4 данным видно, что при термической обработке происходит перераспределение таких химических элементов, как Ni, O, P. При температуре термообработки 400 °С не обнаружено ни одной сквозной поры. На защитные свойства второго слоя покрытия оказывают влияние технологические режимы его обработки. Предполагаемые фазы, образованные после термической обработки второго слоя: AlPO_4 , $\text{Al}_4(\text{P}_2\text{O}_7)_3$, Ni_3Al , NiAl , Al_3Ni , $\text{NiCrO}_4\text{AlPO}_4$, CrPO_4 , $\text{Al}(\text{P}_2\text{O}_7)_3$ [14].

На рис. 5 представлена микрофотография второго слоя, а на рис. 6 — зависимость изменения толщины второго слоя от температуры термообработки и способа нанесения покрытия. По результатам испытаний установлено, что при температуре термообработки 350 °С в течение одного часа обеспечивается наименьший для данного покрытия коэффициент трения 0,07. Это значительно меньше, в сравнении с исходным коэффициентом трения 0,10–0,12 при нормальной работе узла и до 0,18 при выдавливании смазки. В таблице 3 приведены данные по исследованию антифрикционных свойств третьего слоя в зависимости от температуры

его термообработки. Предлагаемое покрытие обеспечивает снижение коэффициента трения почти вдвое, по сравнению с исходным узлом даже при сухом трении.



Рис. 5. Микрофотографии второго слоя, $\times 200$

Таблица 3

Влияние температуры термообработки образцов на их антифрикционные свойства

Температура термообработки, $^{\circ}\text{C}$	300	350	400	450
Коэффициент трения	0,09	0,07	0,09	0,12

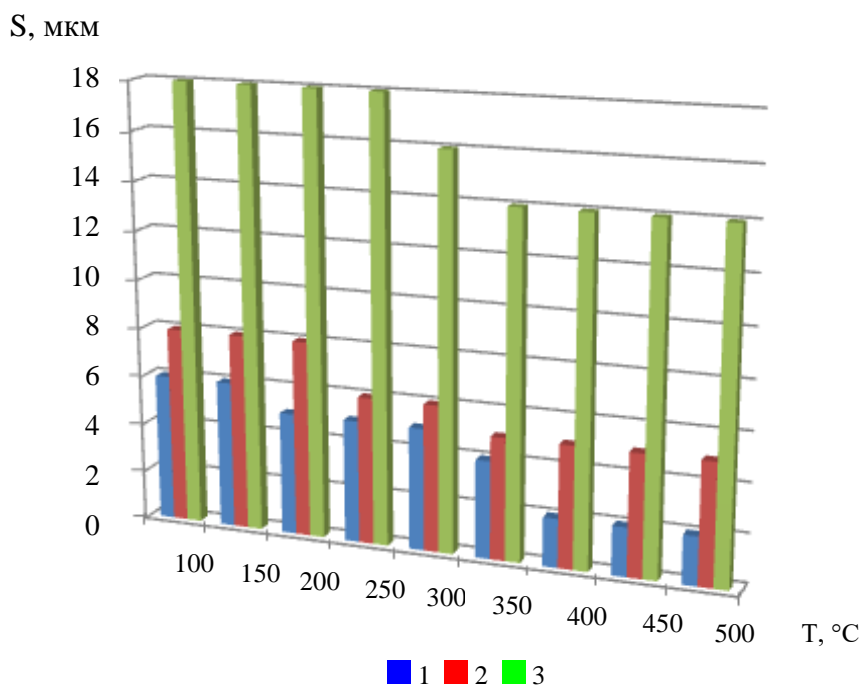
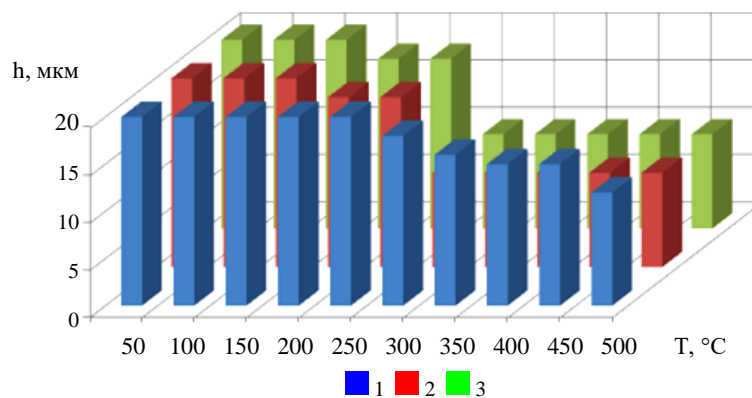


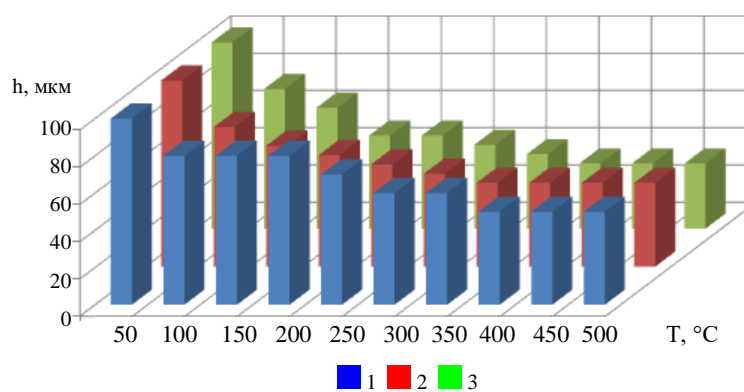
Рис. 6. Изменение толщины второго слоя, получаемое в зависимости от температуры термообработки и способа нанесения покрытия: 1 — метод распыления; 2 — метод окунаия; 3 — метод намазывания

Зависимость толщины третьего слоя от температуры и продолжительности термообработки представлена рис. 7.

На рис. 8 представлена микрофотография, а на рис. 9 — элементный анализ третьего слоя, полученного при температуре термообработки 350°C в течение одного часа.



а)



б)

Рис. 7. Изменение толщины третьего слоя при различных сочетаниях температуры и времени термообработки:

1 — 60 мин.; 2 — 120 мин.; 3 — 180 мин.;

а — покрытие получено методом напыления; б — покрытие получено методом намазывания

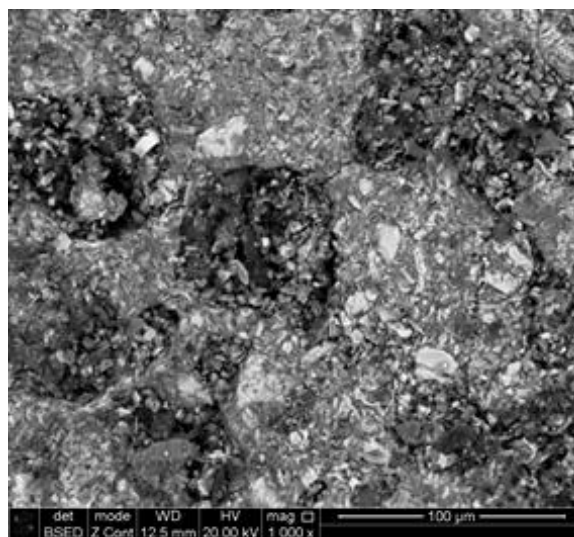


Рис. 8. Микрофотографии третьего слоя

При измерении адгезии третьего слоя в зависимости от его толщины (рис. 10) было установлено, что наилучшие значения результатов получаются при толщине покрытия не более 20 мкм, что и было принято оптимальным.

По результатам полученных зависимостей сформирована рекомендация по достижению оптимальных параметров последнего антифрикционного слоя композиционного покрытия (таблица 4).

Таблица 4

Значения оптимальных параметров для антифрикционного слоя

Element	Weight, %	MDL	Atomic, %	Error, %
O K	35,7	0,23	60,3	10,6
Ne K	0,3	0,13	0,5	24,1
Mg K	1,3	0,10	1,5	10,2
P K	17,4	0,09	15,2	4,7
S K	14,3	0,37	12,1	5,0
Fe K	1,7	0,19	0,8	8,5
Ni K	2,5	0,28	1,1	7,8
Zn K	7,1	0,33	2,9	4,9
Sr L	0,6	0,15	0,2	11,2
Mo L	17,6	0,85	5,0	5,4
Cd L	1,5	0,23	0,4	17,8

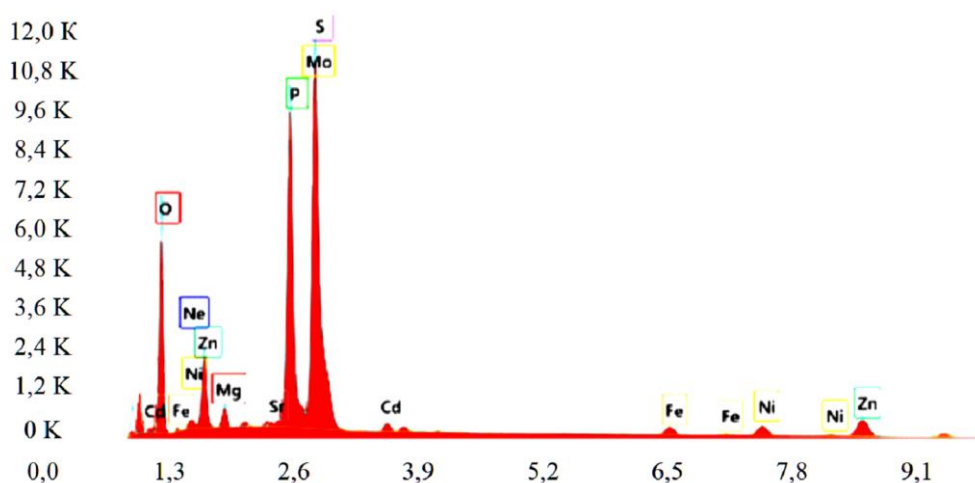


Рис. 9. Элементный анализ третьего слоя

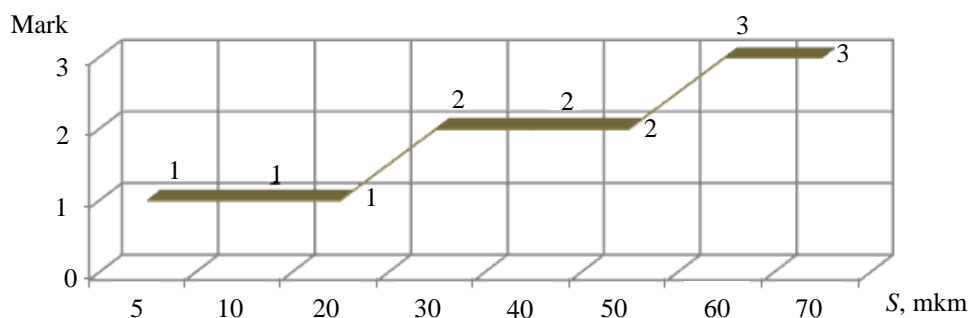


Рис. 10. Изменение адгезии третьего слоя покрытия в зависимости от его толщины

Обсуждение и заключение. Согласно полученным результатам, образец, полученный при температуре термообработки 350 °С и выдержке в течение одного часа, обеспечивает наименьший из возможных для данного покрытия коэффициент трения. По мнению авторов, это объясняется тем, что повышение температуры выше 350 °С обуславливает появление оксидных структур, повышающих коэффициент трения. Температура ниже 350 °С не позволяет сформироваться фосфорсодержащим фазам, повышающим антифрикционные свойства третьего слоя, что соответствует ранее проведенным исследованиям [15].

Полученные результаты позволяют увеличить долговечность самого узла, снизить износ гребней колес и рельсов и повысить безопасность перевозок.

К очевидным достоинствам предлагаемого решения можно отнести то, что оно:

- не требует принципиальных изменений в конструкции фрикционного узла;
- отличается простотой и технологичностью нанесения покрытия;
- не требует значительных материальных затрат;
- не отменяет применения регламентной смазки, а дополняет ее;
- является универсальным.

Предложенное решение вполне может быть применено в любых узлах, например, в сцепных устройствах автомобильного подвижного состава, различных узлах грузоподъемных и транспортных машин, узлах технологического оборудования и т. п.

Список литературы

1. Быков Б.В. *Конструкция и техническое обслуживание грузовых вагонов*. Москва: Желдориздат «Трансинфо»; 2006. 125 с.
2. Павлицкий Б.И. *Повышение надежности опорно-поворотных устройств на основе принципа построения адаптивных систем*. Дисс. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону; 2018. 138 с.
3. Демьянов А.А., Демьянов А.А., Павлицкий Б.И. *Шкворневая система*. Патент РФ, № 2513093. 2014. 5 с. URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2513093> (дата обращения: 02.10.2023).
4. Demyanov A., Demyanov A., Pavlitskiy B., Sherbakov I., Shapshal A., Shapsha S. Reliability improvement of heavy machineries friction units. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;403:012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012015>
5. Федяева Е.А., Ольшевский А.А. Моделирование износа пятникового узла грузового вагона. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2009;(3(23)):83–86.
6. Мотовилов К.В. (ред.), Лукашук В.С., Криворудченко В.Ф. Петров А.А. *Технология производства и ремонта вагонов*. Москва: Маршрут; 2003. 382 с.
7. Shashkeev K.A., Popkov O.V., Yurkov G.Y., Kondrashov S.V., Ashmarin A.A., Biryukova M.I. Composite tribological materials based on molybdenum disulfide nanoparticles and polytetrafluoroethylene microgranules. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016;89(4):644–649. <https://doi.org/10.1134/S1070427216040194>
8. Xiaoming Chen, Liuyang Zhang, Cheol Park, Catharine C. Fay, Xianqiao Wang, Changhong Ke. Mechanical strength of boron nitride nanotube-polymer interfaces. *Applied Physics Letters*. 2015;107(25):253105. <https://doi.org/10.1063/1.4936755>
9. Kucernak A.R.J., Venkata N. Naranammalpuram Sundaram. Nickel phosphide: the effect of phosphorus content on hydrogen evolution activity and corrosion resistance in acidic medium. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2:17435–17445. <https://doi.org/10.1039/c4ta03468f>
10. Kumaravelu P., Arulvel S., Kandasamy J. *Coatings and surface modification techniques for additive manufacturing in innovations in additive manufacturing surface*. In: Khan M.A., Jappes J.T.W. (eds) *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. 2022. P. 221–238. http://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_10
11. Ren Ping, Zhang Shangzhou, Qiu Jianxun, Yang Xiaoyang, Wang Weiwei, Li Yang et al. Self-lubricating behavior of VN coating catalyzed by solute Ag atom under dry friction and oil lubrication. *Surface and Coatings technology*. 2020;409:126845. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126845>
12. Ji Lianggang, Chen Zhaoqiang, Guo Runxin, Xu Chonghai, Guo Niansheng. Preparation of nano-coating powder CaF₂Al(OH)₃ and its application in Al₂O₃/Ti(C,N) self-lubricating ceramic tool materials. *Ceramics International*. 2020;46(10.B):15949–15957. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.144>
13. Pinate S., Leisner P., Zanella C. Wear resistance and self-lubrication of electrodeposited Ni-SiC:MoS₂ mixed particles composite coatings. *Surface and Coatings technology*. 2021;421:127400. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2021.127400>
14. Щербаков И.Н., Трофимов Г.Е., Дерлугян П.Д., Логинов В.Т., Геркен Н.В. *Способ получения композиционного антифрикционного покрытия*. Патент РФ № 2556155. 2015. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2556155C2_20150710.pdf (дата обращения: 02.10.2023)
15. Щербаков И.Н. Особенности получения и свойства композиционного многослойного твердого смазочного покрытия. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2016;(2):97–101. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2016-2-97-101>
16. Щербаков И.Н., Иванов В.В., Дерлугян П.Д., Логинов В.Т. Получение и свойства композиционного твердого смазочного покрытия. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2015;(4):89–92. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-89-92>

References

1. Bykov BV. *Konstruktsiya i tekhnicheskoe obsluzhivanie gruzovykh vagonov*. Moscow: Zheldorizdat Transinfo; 2006. 125 p. (In Russ.)
2. Pavlitskii BI. *Povyshenie nadezhnosti oporno-povorotnykh ustroystv na osnove printsipa postroeniya adaptivnykh sistem*. Author's thesis. Rostov-on-Don; 2018. 138 p. (In Russ.)
3. Demyanov AA, et al. *Shkvornevaia Sistema*. Patent RF, No. 2513093. 2014. 5 p. URL: <https://www.freepatent.ru/patents/2513093> (accessed 02.10.2023). (In Russ.)
4. Demyanov A, Demyanov A, Pavlitskiy B, Sherbakov I, Shapshal A, Shapsha S. Reliability improvement of heavy machineries friction units. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;403:012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012015>
5. Fedyaeva EA, Olshevskii AA. Modelirovanie iznosa pyatnikovogo uzla gruzovogo vagona. *Bulletin of Bryansk state technical university*. 2009;(3(23)):83–86. (In Russ.)
6. Motovilov KV (ed.), Lukashuk VS, Krivorudchenko VF, Petrov AA. *Tekhnologiya proizvodstva i remonta vagonov*. Moscow: Marshrut; 2003. 382 p. (In Russ.)
7. Shashkeev KA, Popkov OV, Yurkov GY, Kondrashov SV, Ashmarin AA, Biryukova MI. Composite tribological materials based on molybdenum disulfide nanoparticles and polytetrafluoroethylene microgranules. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2016;89(4):644–649. <https://doi.org/10.1134/S1070427216040194>
8. Xiaoming Chen, Liuyang Zhang, Cheol Park, Catharine C. Fay, Xianqiao Wang, Changhong Ke. Mechanical strength of boron nitride nanotube-polymer interfaces. *Applied Physics Letters*. 2015;107(25):253105. <https://doi.org/10.1063/1.4936755>
9. Kucernak ARJ, Venkata N Naranammalpuram Sundaram. Nickel phosphide: the effect of phosphorus content on hydrogen evolution activity and corrosion resistance in acidic medium. *Journal of Materials Chemistry A*. 2014;2:17435–17445. <https://doi.org/10.1039/c4ta03468f>
10. Kumaravelu P, Arulvel S, Kandasamy J. *Coatings and surface modification techniques for additive manufacturing in innovations in additive manufacturing surface*. In: Khan M.A., Jappes J.T.W. (eds) *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham. 2022. P. 221–238. http://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_10
11. Ren Ping, Zhang Shangzhou, Qiu Jianxun, Yang Xiaoyang, Wang Weiwei, Li Yang et al. Self-lubricating behavior of VN coating catalyzed by solute Ag atom under dry friction and oil lubrication. *Surface and Coatings technology*. 2020;409:126845. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126845>
12. Ji Lianggang, Chen Zhaoqiang, Guo Runxin, Xu Chonghai, Guo Niansheng. Preparation of nano-coating powder CaF₂Al(OH)₃ and its application in Al₂O₃/Ti(C,N) self-lubricating ceramic tool materials. *Ceramics International*. 2020;46(10.B):15949–15957. <http://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.144>
13. Pinate S, Leisner P, Zanella C. Wear resistance and self-lubrication of electrodeposited Ni-SiC:MoS₂ mixed particles composite coatings. *Surface and Coatings technology*. 2021;421:127400. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2021.127400>
14. Shcherbakov IN, Trofimov GYe, Derlugyan PD, Loginov VT, Gerken NV. *Sposob polucheniya kompozitsionnogo antifriktsionnogo pokrytiya*. Patent RF, No 2556155. 2015. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU2556155C2_20150710.pdf (accessed: 02.10.2023) (In Russ.)
15. Shcherbakov IN. Receiving features and properties of the composition multilayered solid lubricant coatings. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2016;(2):97–101. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2016-2-97-101> (In Russ.)
16. Scherbakov IN, Ivanov VV, Derlugian PD, Loginov VT. Preparation and properties of a composite solid lubricating coating. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2015;(4):89–92. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-4-89-92> (In Russ.)

Поступила в редакцию 05.10.2023

Поступила после рецензирования 18.10.2023

Принята к публикации 01.11.2023

Об авторах:

Алексей Александрович Демьянов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донской государственной технической университет (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: [8504-0447](https://orcid.org/8504-0447), [ORCID](https://orcid.org/8504-0447), [ScopusID](https://scopusid.org/ScopusID), [AuthorID](https://authorid.org/AuthorID), alexys61@yandex.ru

Игорь Николаевич Щербаков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), [ScopusID](#), SPIN-код: 6729-6905, [AuthorID](#), [ResearcherID](#), bdd-don@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

А.А. Демьянов — формирование основной концепции, обработка результатов исследований, обеспечение ресурсами, подготовка текста статьи.

И.Н. Щербаков — подготовка эксперимента, испытаний образцов, обработка результатов исследований, подготовка текста статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 05.10.2023

Revised 18.10.2023

Accepted 01.11.2023

About the Authors:

Aleksey A. Demyanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: [8504-0447](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), alexys61@yandex.ru

Igor N. Shcherbakov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Transport Systems and Logistics Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: [6729-6905](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [AuthorID](#), [ResearcherID](#), bdd-don@mail.ru

Claimed contributorship:

AA Demyanov: formulation of the basic concept, processing of the research results, provision of resources, preparation of the text of the article;

IN Shcherbakov: preparation of the experiment, testing of samples, processing of the research results, preparation of the text of the article.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.